

## О ПОРОГЕ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ НЕОДНОРОДНОЙ ПО ВЫСОТЕ ЗАГРУЗКЕ РЕАКТОРА

**А.М. Загребаев, В.А. Насонова**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*



Приводятся результаты численного моделирования по определению порога начала ксеноновых колебаний в реакторе с неоднородной загрузкой по высоте активной зоны.

**Ключевые слова:** численное моделирование, ксеноновые колебания, порог, загрузка активной зоны, устойчивость реактора, статистические характеристики, дисперсия плотности потока нейтронов.

**Key words:** numerical simulation, xenon oscillations, threshold, core load, nuclear reactor stability, statistical characteristics, neutron flux variance.

### ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации больших энергетических реакторов показывает, что в процессе работы могут возникать пространственные колебания поля энерговыделения. Причиной неустойчивости является наличие пространственно-распределенных положительных обратных связей. Одной из них является обратная связь по ксеноновому отравлению. При этом колебания поля энерговыделения в плане реактора (радиально-азимутальные колебания) достаточно легко подавляются существующими пространственно-распределенными органами регулирования. Колебания же поля энерговыделения по высоте активной зоны подавить гораздо сложнее, поскольку существующие конструкции органов регулирования не позволяют воздействовать на поле нейтронов в локальных областях по высоте реактора.

Физику возникновения ксеноновых колебаний можно пояснить на таком примере. Рассмотрим реактор, в котором система регулирования управляет только интегральной мощностью реактора. Если, например, произошло увеличение плотности потока нейтронов в верхней половине активной зоны, то выгорание ксенона мгновенно увеличится в этой области, а его образование за счет распада йода не успеет измениться. За счет появления положительного избытка коэффициента размножения увеличится плотность потока нейтронов в верхней части реактора. Система регулирования, стремясь сохранить неизменной интегральную мощность реактора, будет равномерно воздействовать на активную зону, т.е. снижать мощность равномерно по высоте, в том числе и в нижней половине. Это обстоятельство приведет к росту концентрации ксенона внизу и, следовательно, к снижению коэффициента размножения в этой области. Таким образом, увеличивается неравномерность в распределении размножающих свойств по высоте активной зоны, что приводит к перекосу поля энерговыделения. Однако по мере накопления йода

процесс пойдет в обратном направлении, т.е. возникают пространственно-временные колебания концентрации ксенона, а следовательно, и распределения энерговыделения.

Методика исследования на устойчивость реактора приводится, например, в работах [1–3]. Изложенный в этих работах подход можно проиллюстрировать на примере одномерного плоского реактора. Условие устойчивости для этого реактора может быть получено достаточно просто. Для этого записывается уравнение для невозмущенного состояния

$$\Delta\varphi_0 + B_0^2 \cdot \varphi_0 = 0 \quad (1)$$

и уравнение после внесения возмущения

$$\Delta\varphi + B^2 \cdot \varphi = 0. \quad (2)$$

При этом полагается, что между материальными параметрами справедливо соотношение

$$B^2 = B_0^2 + \alpha_\varphi \cdot \delta\varphi + \alpha_x \cdot \delta x, \quad (3)$$

где  $\delta\varphi$  и  $\delta x$  – возмущения в поле нейтронов и распределении концентрации ксенона:

$$\delta\varphi = \varphi - \varphi_0; \delta x = x - x_0; \delta i = i - i_0; \quad (4)$$

$M^2$  – квадрат длины миграции;  $\alpha_x = -\frac{\sigma_x}{\Sigma_a \cdot M^2}$ ,  $\alpha_\varphi = -\frac{\alpha_T}{\Sigma_a \cdot M^2}$  – соответственно коэффициенты реактивности по ксеноновому отравлению и уровню потока нейтронов.

Система соотношений (1)–(4) дополняется уравнениями отравления:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \sigma_x \cdot \varphi - \lambda_J \cdot i, \\ \frac{dx}{dt} &= \lambda_J \cdot i - \lambda_x \cdot x - \sigma_x \cdot x \cdot \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где концентрации йода и ксенона нормированы на равновесную концентрацию ксенона при бесконечном потоке.

После подстановки выражений (3) и (4) в уравнения (2) и (5) и последующей их линеаризации легко получить систему уравнений в отклонениях относительно возмущений  $\delta\varphi$  и  $\delta x$ ,  $\delta i$ :

$$\begin{cases} \Delta\delta\varphi + B_0^2 \cdot \delta\varphi + \varphi_0 \cdot \alpha_x \cdot \delta x + \varphi_0 \cdot \alpha_\varphi \cdot \delta\varphi = 0, \\ \frac{d\delta i}{dt} = -\lambda_J \cdot \delta i + \sigma_x \cdot \delta\varphi, \\ \frac{d\delta x}{dt} = \lambda_J \cdot \delta i - \lambda_x \cdot \delta x - \sigma_x \cdot x_0 \cdot \delta\varphi - \sigma_x \cdot \delta x \cdot \varphi_0. \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы уравнений (6) ищется в виде

$$\delta\varphi = \delta\varphi' \cdot e^{\omega t}, \quad \delta i = \delta i' \cdot e^{\omega t}, \quad \delta x = \delta x' \cdot e^{\omega t}.$$

После подстановки этих выражений в систему уравнений (6) получим

$$\begin{cases} \Delta\delta\varphi' + B_0^2 \cdot \delta\varphi' + \varphi_0 \cdot \alpha_x \cdot \delta x' + \varphi_0 \cdot \alpha_\varphi \cdot \delta\varphi' = 0, \\ \omega \cdot \delta i' = \sigma_x \cdot \delta\varphi' - \lambda_J \cdot \delta i', \\ \omega \cdot \delta x' = \lambda_J \cdot \delta i' - \lambda_x \cdot \delta x' - \sigma_x \cdot \varphi_0 \cdot \delta\varphi' - \sigma_x \cdot x_0 \cdot \delta\varphi'. \end{cases} \quad (7)$$

Неизвестные функции  $\delta\varphi'$  и  $\delta x$  представляются в виде разложения по собственным функциям краевой задачи. Например, для «гололого» одномерного реактора имеем

$$\Delta\psi_i + K_i^2 \cdot \psi_i = 0; \quad \psi_i'(0) = \psi_i'(H) = 0; \quad \psi_i = A \cdot \cos \frac{\pi(i+1)}{H} \cdot x; \quad B_0^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2; \quad (8)$$

$$\delta\varphi'(x) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cdot \psi_i(x); \quad \delta x'(x) = \sum_{i=0}^{\infty} B_i \cdot \psi_i(x).$$

Подстановка выражений (8) в систему уравнений (7), почленное умножение на  $\psi_j$  и интегрирование по объему (с учетом ортогональности собственных функций) дает систему линейных однородных уравнений относительно неизвестных коэффициентов  $A_j$  и  $B_j$ :

$$\begin{cases} A_j \cdot \left[ \frac{\sigma_x \cdot \lambda_j}{\omega + \lambda_j} - \sigma_x \cdot R_{x_j} \right] - B_j \cdot [\omega + \lambda_x + \sigma_x \cdot R_{\varphi_j}] = 0; \\ A_j \cdot [-K_j^2 + B_0^2 + \alpha_\varphi \cdot R_{\varphi_j}] + B_j \cdot [\alpha_x \cdot R_{\varphi_j}] = 0. \end{cases}$$

Из условия существования нетривиального решения системы линейных однородных уравнений получим характеристическое уравнение

$$\omega_j^2 + b_j \cdot \omega_j + c_j = 0. \quad (9)$$

Поскольку отклонения от невозмущенного состояния описываются выражениями

$$\delta\varphi(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cdot \psi_i(x) \cdot e^{\omega_i t},$$

$$\delta x(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} B_i \cdot \psi_i(x) \cdot e^{\omega_i t},$$

то, если действительная часть  $\omega_j$  меньше нуля, колебания затухают, в противном случае поле энерговыделения неустойчиво на данной гармонике. Понятно, что знак корней определяется знаком  $b_j$ . Если  $b_j < 0$  – реактор неустойчив,  $b_j > 0$  – реактор устойчив.

Явное выражение для  $b_j$  следующее:

$$b_j = \lambda_x + \lambda_j + \sigma_x \cdot R_{\varphi_j} - \frac{\sigma_x \cdot \alpha_x \cdot R_{x_j} \cdot R_{\varphi_j}}{B_0^2 - K_j + \alpha_\varphi \cdot R_{\varphi_j}}. \quad (10)$$

Конкретизируя выражение порога устойчивости для реактора с размером активной зоны  $H/M$ , мощностным коэффициентом  $\alpha_T$  и распределением поля энерговыделения  $\varphi_0(x)$ , получим, что поле энерговыделения устойчиво по  $j$ -й гармонике, если выполняется неравенство

$$\left(\frac{H}{M}\right)^2 < \frac{\pi \cdot j^2}{\frac{\sigma_x \cdot R_{x_j}}{\Sigma_a} \cdot f(R_{\varphi_j}) + \alpha_T \cdot R_{\varphi_j}}, \quad (11)$$

где  $R_{\varphi_j} = \frac{\int_0^H \varphi_0 \cdot \psi_j^2 dx}{\int_0^H \psi_j^2 dx}$ ,  $R_{x_j} = \frac{\int_0^H x_0 \cdot \psi_j^2 dx}{\int_0^H \psi_j^2 dx}$ .

Из выражения (11) видно, что устойчивость поля энерговыделения в реакторе по отношению к возбуждению  $j$ -й гармонике определяется

- мощностью реактора и ее распределением до возмущения (параметры  $R_{\phi_j}, R_{X_j}$ );

- величиной коэффициента обратной связи по мощности (обычно  $\alpha_T < 0$ );
- размером реактора, выраженного в длинах миграции  $H/M$ .

Из выражения (11) видно, что нулевая гармоника (фундаментальное решение) неустойчива при любом размере реактора (положительная обратная связь по ксенону). Более высокие гармоники неустойчивы при определенных соотношениях между параметрами.

На рисунке 1 показаны области устойчивости при фиксированном размере реактора в зависимости от величины мощностного коэффициента реактивности и уровня мощности реактора.

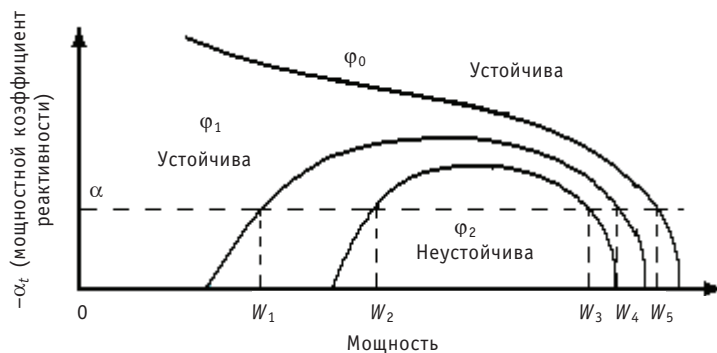


Рис. 1. Области устойчивости реактора

Из рисунка видно, что если, например, реактор обладает отрицательным мощностным коэффициентом реактивности  $\alpha_T = -\alpha$  (пунктирная линия), то при увеличении уровня мощности состояние поля энерговыделения будет меняться следующим образом:

- при  $W < W_1$  неустойчивой является основная гармоника – мощность  $\phi_0$ ;
- $W_1 < W < W_2$  – возникает неустойчивость не только по уровню мощности, но и по пространственным перекосам по половинам реактора (неустойчива первая гармоника –  $\phi_1$ ), т.е. возникновение ксеноновых колебаний (нижняя граница порога);
- $W_2 < W < W_3$  – возникают дополнительные колебания по второй гармонике (провалы и выпуклости в центре активной зоны) –  $\phi_2$ ;
- $W_3 < W < W_4$  – стабилизируется вторая гармоника за счет роста отрицательного мощностного эффекта реактивности;
- $W_4 < W < W_5$  – стабилизируется первая гармоника за счет роста мощностного эффекта реактивности, т.е. окончание ксеноновых колебаний (верхняя граница порога);
- $W > W_5$  – стабилизация интегральной мощности реактора.

В больших энергетических реакторах на тепловых нейтронах в рабочих диапазонах мощностей неустойчивость, как правило, проявляется лишь по первой гармонике, т.е. к перекосам по половинам активной зоны. Несмотря на то, что период колебаний составляет несколько часов, т.е. достаточно медленный процесс, теоретические алгоритмы подавления колебаний на практике реализовать достаточно сложно.

Рассматривается вопрос использования ТВС с различными размножающими свойствами по высоте активной зоны (профилированная по высоте загрузка), в частности, предлагается вводить области с выгорающим поглотителем, например,

эрбием [4]. Понятно, что при изменении загрузки количественные соотношения между мощностью, размером реактора и величиной коэффициента реактивности при определении порога ксеноновых колебаний будут другие. Возникает вопрос: можно ли так сформировать загрузку топлива по высоте активной зоны, чтобы ксеноновые колебания вообще не возникали при существующих технологических ограничениях, например, на линейную нагрузку на твэл?

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Предлагается использовать математическую модель для «прямого» моделирования ксеноновых колебаний, которая включает в себя уравнение для плотности потока нейтронов в одногрупповом диффузионном приближении, уравнения пространственно-распределенных обратных связей, системы регулирования и генератора возмущений в макроскопических свойствах среды с произвольной загрузкой [5]. При этом порог начала колебаний определялся следующим образом. Фиксировались размер реактора, топливная загрузка и уровень мощности реактора. Активная зона реактора разбивалась на подзоны (количество подзон варьировалось от 14 до 48) и в одну из них вносилось возмущение в макроскопическое сечение поглощения длительностью 100 с. Критичность обеспечивалась равномерным введением органов регулирования. Так как порог возникновения колебаний «по теории» зависит от уровня мощности, то постепенно уровень мощности повышался. Считалось, что ксеноновых колебаний нет, если разбаланс концентраций ксенона по половинам реактора не превышал 20% в течение пяти суток после внесения возмущения. В противном случае фиксировалась ситуация достижения порога колебаний.

Тестирование программного комплекса по обнаружению ксеноновых колебаний проводилось путем сравнения с аналитическим решением (11) для однородной загрузки. При этом расхождение в значении уровня мощности, при котором возникают ксеноновые колебания, не превышало 1%. Исходя из этого было принято решение о возможности оценки порога ксеноновых колебаний в реакторе с неоднородной загрузкой.

На рисунке 2 показаны рассмотренные в работе компоновки, сформированные из двух зон с различными размножающими свойствами. Первая зона имела обогащение 3,2% с содержанием эрбия 0,7% (при этом  $K_{\infty} = 1,16$ ), а вторая зона – обогащение 2,5% и содержание эрбия 0,3% ( $K_{\infty} = 1,13$ ). Вторая зона имела фиксированный размер  $H/M = 5$ .

Расчеты проводились для топлива с глубиной выгорания 10, 15 и 20 МВт-сут/кгU при фиксированном размере активной зоны  $H/M = 35$ .

Результаты расчета порога ксеноновых колебаний в зависимости от места расположения областей с различным коэффициентом размножения для различных глубин выгорания топлива приведены на рис. 3.

Значения порога приведены в относительных единицах, за базовый уровень принят порог при равномерной загрузке реактора и глубине выгорания топлива 10 МВт-сут/кгU.

Исследовалась также зависимость влияния размера второй зоны на устойчивость, на рис. 4 показана зависимость порога возникновения ксеноновых колебаний для различных компоновок при глубине выгорания 10 МВт-сут/кгU.

Из приведенных рисунков видно, что всегда предпочтительной является компоновка, состоящая из центральной зоны с повышенным коэффициентом размно-

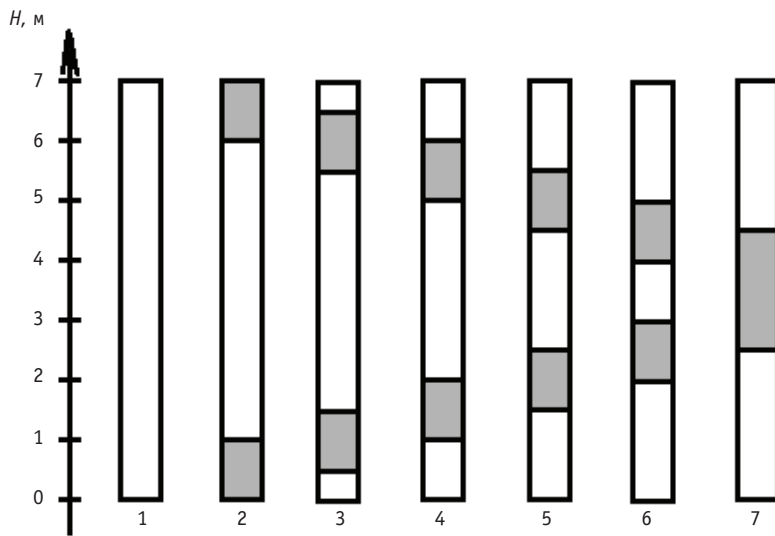


Рис. 2. Компоновка загрузки реактора по высоте активной зоны: □ – зона1; ■ – зона2

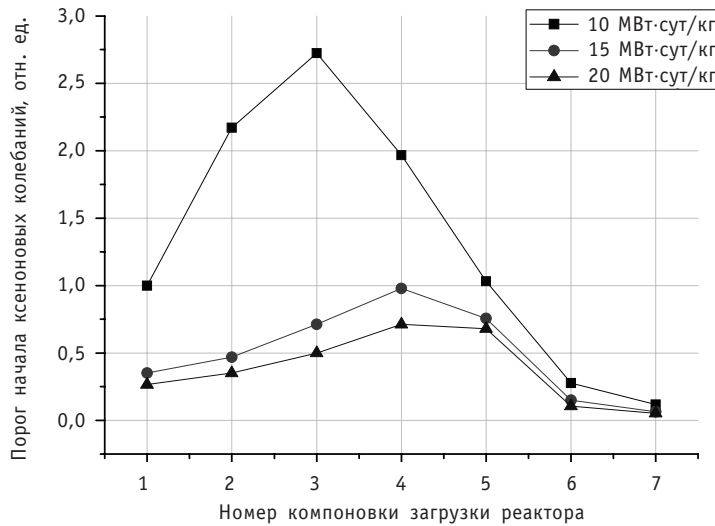


Рис. 3. Зависимость относительного значения порога возникновения ксеноновых колебаний от компоновки активной зоны при различных глубинах выгорания

жения, затем симметрично расположенных зон с пониженным коэффициентом размножения и двух периферийных зон с повышенным коэффициентом размножения. Представляется, что физически данный эффект можно объяснить следующим образом. Во-первых, периферийные зоны с большим коэффициентом размножения оказывают стабилизирующее влияние за счет роста утечки нейтронов, а расположенные рядом зоны с пониженными размножающими свойствами оказывают диссипативное влияние на рост плотности потока нейтронов. Во-вторых, исследование статистических характеристик плотности потока нейтронов показало[5], что при приближении реактора к порогу ксеноновых колебаний изменяется вид дисперсии плотности потока нейтронов (рис. 5), а именно, пики дисперсии увеличиваются и перемещаются ближе к краю реактора.

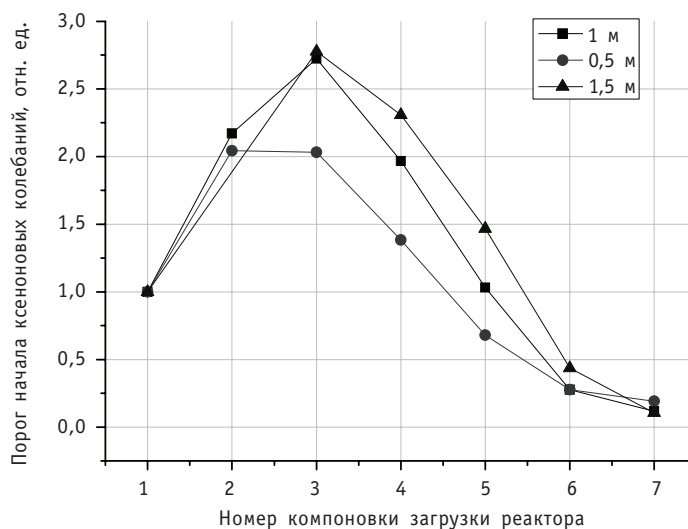


Рис. 4. Зависимость относительного значения порога возникновения ксеноновых колебаний от компоновки активной зоны при различных размерах второй зоны

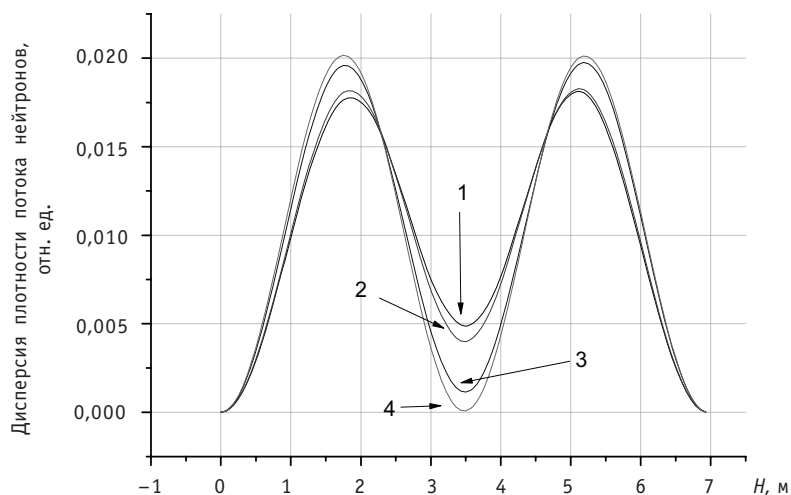


Рис. 5. Форма дисперсии плотности потока нейтронов при приближении реактора к порогу ксеноновых колебаний: 1 – мощность составляет 40% от мощности при которой начинаются ксеноновые колебания, 2 – 60%, 3 – 80%, 4 – 100%

Следовательно, размещение зон с пониженными размножающими свойствами в областях с максимальной дисперсией стабилизирует поле нейтронов.

Приведенные результаты исследований показывают, что возможность профилирования по высоте реактора загрузки топлива позволяет не только ставить задачи по оптимизации физических характеристик реактора, но и по-новому подойти к решению задач устойчивости поля энерговыделения.

**Авторы выражают признательность А.М. Федосову за интерес к работе и предоставленные физические константы для расчетов.**

**Литература**

1. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов/Пер. с англ. под ред. В.Н. Артамкина. – М.: Атомиздат, 1974.
2. Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. – М.: Атомиздат, 1975.
3. Хитчкок А. Устойчивость ядерных реакторов/Пер. с англ. М.: Госатомиздат, 1963. 65 с.
4. Петров И.В., Шульман Ю.С., Рябов В.В. и др. Тепловыделяющая сборка канального ядерного реактора с профилированным топливом. Патент РФ от 10.11.2009 № 2372676. – бюл. № 31 «Изобретения и полезные модели».
5. Загребаев А.М., Насонова В.А. Вероятностные характеристики плотности потока нейтронов в ядерном реакторе при случайных возмущениях в свойствах среды//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №4. – С.71-78.

Поступила в редакцию 25.02.2011



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.516.2.232

*About the Xenon Oscillations Boundary in the Reactor with Nonhomogeneous Axial Load* \A.M. Zagrebayev, V.A. Nasonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

The results of modeling for estimation the xenon oscillations boundary in the reactor with nonhomogeneous axial load are given.

### УДК 621.039.526: 621.039.59

*One-group Fission Cross Sections for Plutonium and Minor Actinides in Neutron Spectra of Fast Reactor Cooled with Lead-208 or Lead-Bismuth* \G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 3 tables. – References, 8 titles.

One-group fission cross sections of isotopes of plutonium and minor actinides- Np-237, Am-241, 243 and Cm-246 – in neutron spectra of fast reactor RBEC-M cooled with Pb-Bi or Pb-208 are calculated on the basis of 28 group system ABBN. As a result of replacement of Pb-Bi coolant over Pb-208 coolant, the mean energy of neutrons increases on 6.4% and 6.1% in the core and lateral blanket, respectively. Under such neutron spectra hardening, the one-group fission cross section increases on 6% for Pu-240 and on 10% for Am-241.

### УДК 621.039.526: 621.362

*Space Nuclear Power System Based on SAFE Fast Reactor with Low-temperature Thermionic Converters* \V.I. Yarygin, G.E. Lazarenko, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 18 titles.

The possibility of low-temperature thermionic converters (emitter temperature  $T_e \leq 1700$  K) appliance for space nuclear power system (SNPS) based on fast SAFE (Safe Affordable Fission Engine) reactor with thermal power of 300 kW for long-term operation as a part of the lunar base have been discussed.

The results of systematic optimization for SNPS parts and equipment and the calculations for mass-dimensional characteristics are presented and also the life cycle of SNPS is specified.

### УДК 621.039.534.3

*Oxygen and Hydrogen Control Systems Used in Gas Circuits and NPP Containment Vessels* \P.N. Martynov, M.E. Chernov, A.N. Storozhenko, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.

Increased reliability and safety of the operation of one-piece reactors and installations using Pb-Bi and Pb as coolant require the development and improvement of the systems able to diagnose the state of the coolant and detect at early stages the possibility of accident situations. The main controlled parameters are the oxygen activity in the coolant and the concentration of oxygen and hydrogen in the gas phase circuit. The most promising devices enabling control of these parameters are the solid electrolyte sensors made of ceramic oxide, which allow measurement to be taken in the continuous mode under conditions of high temperatures, pressures, velocities of the environment and thermal shocks.

### УДК 621.039.534.6

*The Combustible and Explosive Gases Control System Based on Solid-electrolyte Ceramic Sensors* \P.N. Martynov, M.E. Chernov, A.N. Storozhenko, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, A.S. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The most important task of ensuring the safe operation of production facilities related to the production, use, storage and processing of combustible gases and easily flammable liquids (oil and